

<div><div>AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE</div><div>ANR</div></div>	<div>Compte-rendu de fin de projet</div>	



Projet ANR-07-BLAN-0121

STAMP

**Spatial Temporal And Multiscale Primitives
for modelling dynamic landscapes**

Programme Blanc 2007

A	IDENTIFICATION.....	2
B	RESUME CONSOLIDE PUBLIC	3
B.1	Résumé consolidé public en français	3
B.2	Résumé consolidé public en anglais.....	4
C	MEMOIRE SCIENTIFIQUE.....	5
C.1	Résumé du mémoire	5
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art	6
C.3	Approche scientifique et technique.....	8
C.4	Résultats obtenus	9
C.5	Discussion	14
C.6	Conclusions.....	15
C.7	Références.....	16
D	LISTE DES LIVRABLES.....	17
E	IMPACT DU PROJET	17
E.1	Indicateurs d'impact	17
E.2	Liste des publications et communications.....	18
E.3	Liste des éléments de valorisation.....	19
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)	20
F	ANNEXES	21

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	STAMP
Titre du projet	Spatial Temporal And Multiscale Primitives for modelling dynamic landscapes
Coordinateur du projet (société/organisme)	Danny LO SEEN (CIRAD)
Période du projet (date de début – date de fin)	Janvier 2008 – Mai 2011
Site web du projet, le cas échéant	wiki.ocelet.fr

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Mr. Danny LO SEEN
Téléphone	0467548734
Adresse électronique	loseen@teledetection.fr
Date de rédaction	Avril 2011

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	INRA – UMR AMAP – Mr Daniel AUCLAIR INRIA – Sophia Antipolis – Mr Didier Parigot Université Paris-Est – LIGM – Mr Olivier CURE
---	--

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

B.1 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

Un nouvel outil pour modéliser les paysages dynamiques et simuler leur évolution

Représenter les évolutions observées d'un paysage dans le temps, en lien avec les processus qui en sont à l'origine...

L'analyse d'images satellite prises à plusieurs années d'intervalle montre que les paysages changent au cours du temps. Ces changements sont révélateurs de processus en cours, multiples et complexes, que les chercheurs ont pour objectifs de comprendre et de décrire. Pour faire le lien entre les changements observés et les processus qui en sont à l'origine, ils utilisent la modélisation spatiale et temporelle, à différentes échelles d'analyse. Plusieurs approches de modélisation ont été proposées pour répondre à ce besoin, les plus connues étant basées sur les automates cellulaires, les systèmes multi-agents, les systèmes à événements discrets, les systèmes à compartiments et les systèmes d'information géographique. Ces approches ont chacune trouvé des domaines d'applications où elles ont pu montrer leurs intérêts, mais la recherche sur la modélisation de l'environnement reste organisée autour d'outils peu compatibles entre eux, dans des communautés très dynamiques et finalement assez cloisonnées, alors même que l'intégration de différentes disciplines est plus que jamais nécessaire pour répondre aux nombreuses questions importantes auxquelles nos sociétés actuelles sont confrontées.

... en faisant appel à un langage de modélisation, pour décrire les paysages, leur dynamique, et lancer des simulations

Une faiblesse de ces approches est la forte contrainte liée au format utilisé pour représenter les entités spatiales, ce qui oblige le modélisateur à réfléchir en termes de grilles, points, lignes ou polygones. Pour tenter de lever cette contrainte, nous explorons ici une approche basée sur l'emploi de primitives de modélisation. Pour cela, il a fallu identifier et définir formellement les concepts essentiels pour le modélisateur, construire un langage informatique de modélisation (baptisé Ocelet), avec grammaire et syntaxe, pour manipuler ces concepts, et ensuite construire le compilateur, l'interface de modélisation et l'environnement d'exécution de simulations. Avec Ocelet, le paysage est considéré comme un système où des entités interagissent entre elles au travers de relations. Le langage peut utiliser des primitives préconstruites pour décrire ces entités, les mettre en relation, et établir des scénarios d'évolution du système. L'étude de plusieurs cas réels et complexes, aussi divers que la dynamique des mangroves sur les côtes guyanaises ou la fièvre de la vallée du Rift dans la zone des mares du Ferlo au Sénégal, a permis non seulement d'identifier les concepts appropriés, mais aussi de les mettre à l'épreuve.

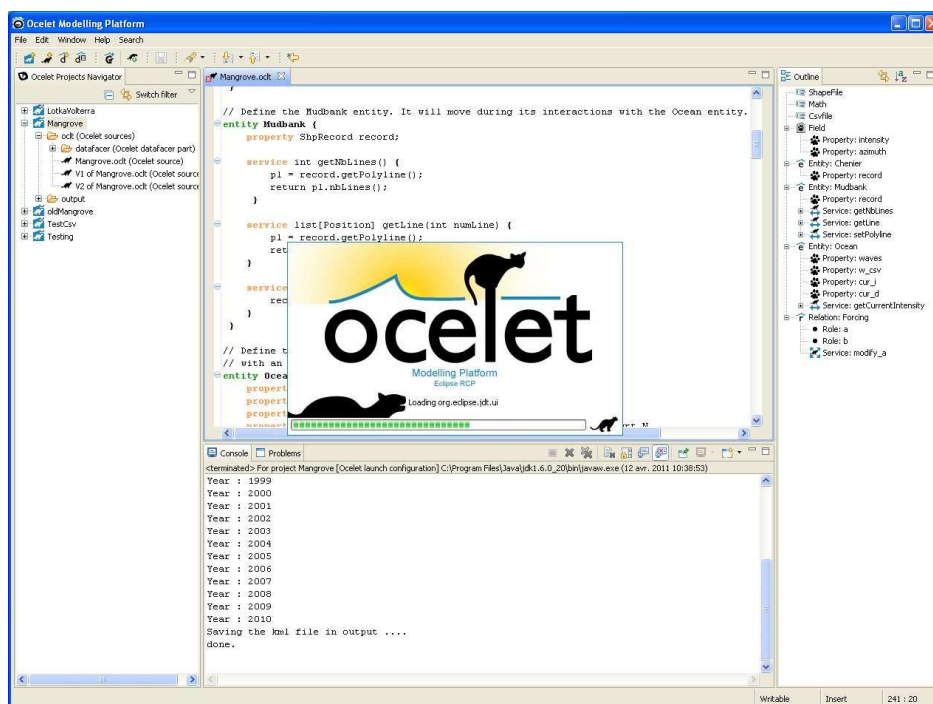
Résultats majeurs du projet

Le résultat concret de ce projet est un outil qui permet de modéliser avec une grande liberté d'expression une portion de territoire pour pouvoir simuler son évolution dans le temps. Il se présente comme un environnement logiciel donnant accès à un ensemble de méthodes et des bibliothèques de primitives, que les modélisateurs peuvent enrichir ou utiliser selon leurs besoins. L'approche est basée sur la manipulation de graphes (objet mathématique exprimant un ensemble d'entités dont certaines sont en interaction), qui sont employés ici de manière innovante pour la modélisation de paysages dynamiques.

Production scientifique et brevets depuis le début du projet

Le projet a fourni le cadre scientifique et une partie des financements pour deux thèses de doctorat, plusieurs stages de Master 2^{ème} année ou de mémoire de diplôme d'ingénieur. Plusieurs articles et communications méthodologiques (informatique, modélisation) et thématiques (environnement) ont été publiés (6) pour exposer l'originalité de notre approche, et pour présenter les premiers résultats. Un de nos travaux a reçu un « Best Paper Award ». Le logiciel développé lors du projet fait l'objet d'un dépôt à l'APP (Agence pour la Protection des Programmes).

Illustration



Aperçu de l'environnement de modélisation Ocelet / Screenshot of the Ocelet modelling environment

Informations factuelles du projet

Le projet STAMP est un projet de recherche fondamentale coordonné par Danny Lo Seen. Il associe l'UMR TETIS (Cirad ; responsable de projet : Pascal Degerne) à l'équipe Zenith de l'INRIA (responsable de projet : Didier Parigot), le laboratoire d'informatique Gaspard Monge de l'Université Paris Est (responsable de projet : Olivier Curé) et l'UMR AMAP (INRA, IRD ; responsable de projet : Daniel Auclair). Le projet a fait l'objet d'une décision d'attribution d'aide de l'ANR le 12 novembre 2007. Démarrage effectif en janvier 2008 pour une durée de 36 mois. Après autorisation d'un report de 6 mois signifiée le 18 août 2010, la nouvelle date de fin de projet a été fixée au 11 mai 2011. Il a bénéficié d'une aide ANR de 183 k€ pour un coût global de l'ordre de 1 053 k€.

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

A new tool for modelling and simulating landscape dynamics

Represent landscape temporal evolutions in relation with the processes from which they originate...

The analysis of time series of satellite images shows that landscapes change over years. These changes are expressions of multiple and complex ongoing processes that researchers seek to understand and document. In order to link the observed changes to the processes from which they originate, spatial and temporal modelling at different scales is required. Various approaches have been proposed to address this need, including cellular automata, agent-based systems, discrete event systems, system dynamics and geographic information systems. Each of these approaches has demonstrated specific benefits in different domains of application. However, research on environmental modelling remains organised around tools that are not quite inter-compatible, in very dynamic but separate research communities, whereas integration of different disciplines is crucial given the important challenges facing societies today.

...using a modelling language for describing landscapes and their dynamics, and for running simulations

A known limitation of these approaches is the strong constraint relative to the format used to represent spatial entities, urging the modeller to think in terms of grids, points, lines or polygons. We attempt to overcome this constraint by exploring an approach based on the use of modelling primitives. In the process, it was necessary to identify and formally define concepts that are essential for modellers, then build a modelling computer language (called Ocelet), together with the grammar and syntax needed to manipulate these concepts, and finally, to develop the compiler and the environment/interface for building models and running simulations. With Ocelet, the landscape is seen as a system composed of entities that interact through relations. The language allows using pre-developed primitives to describe these entities, the relations that link them, and to establish evolution scenarios of the system. The study of several real and complex cases such as the mangrove dynamics on the coasts of Guyana, or the Rift Valley Fever that develops around temporary ponds in the Ferlo region of Northern Senegal, served to identify the appropriate concepts, and also to test them.

Main project results

The main result of the project is a tool that allows greater expressive power when modelling landscape evolution in time. It comes in the form of a software environment that gives access to a set of methods and primitives libraries that the modeller can use or contribute to develop. The approach is based on the manipulation of graphs (mathematical object expressing a set of entities, some of which are linked) that are employed here in an innovative way for modelling dynamic landscapes.

Scientific production and patents since beginning of project

The project provided the scientific framework and part of the funds for two doctoral theses, several Master and Engineering degree internships. Six methodological (computer science, modelling) or thematic (environment) articles or communications have been published to describe the originality of our approach or to present the first results. One of our works received a "Best Paper Award". The software developed during the project is being referenced at the APP (*Agence pour la Protection des Programmes*).

Factual information on the project

The STAMP project is a basic research project coordinated by Danny Lo Seen. The project partners are the TETIS research unit (Cirad; team leader: Pascal Degenne), the Zenith team of INRIA (team leader: Didier Parigot), the Gaspard Monge Computer laboratory of Paris-Est University (team leader: Olivier Curé) and the AMAP research unit (INRA, IRD; team leader: Daniel Auclair). The decision for project funding by ANR was notified on November 12th, 2007. The effective start of the project was January 2008, for a period of 36 months. A six month extension was approved on August 18th, 2010, which brought the official project end to May 11th, 2011. The project received a funding of 183 k€ from the ANR; the total cost of the project being of the order of 1,053 k€.

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Mémoire scientifique confidentiel : non

C.1 RESUME DU MEMOIRE

L'analyse d'images satellite prises à plusieurs années d'intervalle montre que les paysages changent au cours du temps. Ces changements sont révélateurs de processus en cours, multiples et complexes, que les chercheurs ont pour objectifs de comprendre et de décrire. Pour faire le lien entre les changements observés et les processus qui en sont à l'origine, ils utilisent la modélisation spatiale et temporelle, à différentes échelles d'analyse. Plusieurs approches de modélisation ont été proposées pour répondre à ce besoin, les plus connues étant basées sur les automates cellulaires, les systèmes

multi-agents, les systèmes à événements discrets, les systèmes à compartiments et les systèmes d'information géographique. Ces approches ont chacune trouvé des domaines d'applications où elles ont pu montrer leurs intérêts, mais la recherche sur la modélisation de l'environnement reste organisée autour d'outils peu compatibles entre eux, dans des communautés très dynamiques et finalement assez cloisonnées, alors même que l'intégration de différentes disciplines est plus que jamais nécessaire pour répondre aux nombreuses questions importantes auxquelles nos sociétés actuelles sont confrontées.

Une faiblesse de ces approches est la forte contrainte liée au format utilisé pour représenter les entités spatiales, ce qui oblige le modélisateur à réfléchir en termes de grilles, points, lignes ou polygones. Pour tenter de lever cette contrainte, nous explorons ici une approche basée sur l'emploi de primitives de modélisation. Pour cela, il a fallu identifier et définir formellement les concepts essentiels pour le modélisateur, construire un langage informatique de modélisation (baptisé Ocelet), avec grammaire et syntaxe, pour manipuler ces concepts, et ensuite construire le compilateur, l'interface de modélisation et l'environnement d'exécution de simulations. Avec Ocelet, le paysage est considéré comme un système où des entités interagissent entre elles au travers de relations. Le langage peut utiliser des primitives préconstruites pour décrire ces entités, les mettre en relation, et établir des scénarios d'évolution du système. L'étude de plusieurs cas réels et complexes, aussi divers que la dynamique des mangroves sur les côtes guyanaises ou la fièvre de la vallée du Rift dans la zone des mares du Ferlo au Sénégal, a permis non seulement d'identifier les concepts appropriés, mais aussi de les mettre à l'épreuve.

Le résultat concret de ce projet est un outil qui permet de modéliser avec une grande liberté d'expression une portion de territoire pour pouvoir simuler son évolution dans le temps. Il se présente comme un environnement logiciel donnant accès à un ensemble de méthodes et des bibliothèques de primitives, que les modélisateurs peuvent enrichir ou utiliser selon leurs besoins. L'approche est basée sur la manipulation de graphes (objet mathématique exprimant un ensemble d'entités dont certaines sont en interaction), qui sont employés ici de manière innovante pour la modélisation de paysages dynamiques.

Le projet a fourni le cadre scientifique et une partie des financements pour deux thèses de doctorat, un stage de Master 2^{ème} année et un mémoire de diplôme d'ingénieur. Plusieurs articles et communications méthodologiques (informatique, modélisation) et thématiques (environnement) ont été publiés (6) pour exposer l'originalité de notre approche, et pour présenter les premiers résultats. Un de nos travaux a reçu un « *Best Paper Award* ». Le logiciel développé lors du projet fait l'objet d'un dépôt à l'APP (Agence pour la Protection des Programmes).

C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

Enjeux et problématique

La modélisation de systèmes dans l'espace et dans le temps est une pratique courante dans de nombreuses disciplines scientifiques. Elle permet notamment d'éprouver la connaissance que l'on a d'un système, d'en mieux cerner le fonctionnement, dans l'optique d'en prédire l'évolution suivant différents scénarios. Nombre de défis auxquels nos sociétés actuelles sont confrontées, tels que la dégradation des écosystèmes naturels (réduction de biodiversité), l'émergence et la diffusion de nouvelles maladies (contraintes environnementales, changements climatiques), l'extension urbaine (migrations économiques) ou encore l'insécurité alimentaire (modifications profondes des moyens de production), ont pour objet d'étude le *paysage*, en tant que lieu de vie végétale, animale ou humaine. Dans ces paysages, les changements qui peuvent être observés à différentes échelles spatiales et temporelles, résultent de processus multiples et complexes, que les chercheurs ont pour objectifs de comprendre et de décrire. Cette complexité est cependant difficile à analyser par une expérimentation

instrumentale de terrain. La modélisation et la simulation numériques deviennent alors des outils de choix pour les chercheurs des disciplines concernées, quand ce ne sont pas tout simplement les seuls disponibles. Comment alors faire le lien entre les changements observés, les processus qui en sont à l'origine et les conséquences supposées de ces changements ?

Etat de l'art

Plusieurs approches de modélisation ont été proposées pour répondre à ce type de besoins, les plus connus étant basées sur les automates cellulaires, les systèmes multi-agents, les systèmes à événements discrets, les systèmes à compartiments et les systèmes d'information géographique. Un état de l'art de chacune de ces approches, et des travaux qui les utilisent dans les différentes communautés scientifiques (notamment celles qui s'intéressent à l'écologie du paysage, la géographie, l'épidémiologie, la dynamique forestière ou côtière, etc.) n'est pas envisageable dans ce présent document. Il fait cependant l'objet d'un chapitre de la thèse de Pascal Degenne (2011) que le lecteur est invité à consulter. En résumé, le constat général est que la recherche sur la modélisation de dynamiques spatiales est menée dans des communautés utilisant des approches qu'il est possible de classer en grandes familles :

- 1) Approches descendantes. A partir d'une vision globale du système que l'on étudie, on essaye d'en distinguer les mécanismes généraux, puis éventuellement de détailler chacun d'eux en sous-mécanismes, et ainsi de suite. Dans cette famille on trouve la modélisation de systèmes dynamiques avec les équations différentielles (e.g. le modèle logistique de Verhulst (1838) ; le modèle proie-prédateur – Lotka (1925) & Volterra (1926), en dynamique des populations), les modèles compartimentaux en épidémiologie (modèle SIR de Kermack et MacKendrick, 1927) et la Dynamique des Systèmes (*Systems Dynamics* de Forrester (1968) et des logiciels qui implémentent l'approche *stock-flow* tels que Stella (e.g. Costanza, 1987) et Vensim (e.g. Eberlein and Peterson, 1992)). On notera aussi que le caractère spatial des systèmes étudiés n'est pas explicite et que dans la plupart des cas la structure du modèle, c'est à dire l'ensemble des liens que l'on introduit entre les variables, est statique.
- 2) Approches ascendantes. On décrit dans ce cas les règles de comportements d'entités élémentaires d'un système (individu, cellule, agent, ...) et l'on simule les interactions d'un grand nombre de ces entités pour observer l'évolution de l'ensemble du système. Les deux principales formes de modélisation de ce type sont les automates cellulaires, et les systèmes multi-agents. Les automates cellulaires (von Neumann, 1966) ont beaucoup été utilisés dans les études de dynamique urbaine (e.g. Langlois et Phipps, 1997 ; Batty et al, 1999) ou de changements d'occupation du sol (e.g. Lajoie et Hagen-Zanker, 2007), avec l'espace géographique découpé en cellules. Ce sont des modèles dynamiques à structure statique : la topologie du réseau de cellules qui constituent l'automate ne change pas durant une simulation et les règles de voisinage entre cellules non plus. La taille des cellules est fixe et rend difficile la modélisation de phénomènes impliquant des interactions à différents niveaux d'échelles. Les règles de transition (entre les états d'une cellule) sont identiques pour toutes les cellules.

Issus des travaux relatifs aux systèmes distribués en intelligence artificielle, les systèmes multi-agents (SMA) ont ouvert la voie à un grand nombre d'applications (Ferber, 1995 ; Bousquet et Le Page, 2004) où le système à étudier implique des agents capables de communiquer entre eux, et qui ont des objectifs propres à atteindre, avec pour cela une certaine autonomie dans leur capacité de décision. Les agents évoluent dans un environnement dans lequel ils se déplacent et puisent des ressources (nourriture, énergie, information localisée). Plusieurs outils tels que Cormas (Bousquet et al, 1998), Netlogo (Wilensky, 1999) ou Swarm (Minar et al, 1996), ont rendu cette approche accessible à une large communauté d'utilisateurs. L'environnement proposé par défaut est un découpage de l'espace en cellules, mais certains outils permettent un interfaçage avec les systèmes d'information géographique (SIG). Cependant, les opérateurs spatiaux que l'on trouve dans les SIG sont au pire absents (auquel cas l'environnement géographique est statique et ne sert

que de support aux agents), et au mieux disponibles par programmation en accédant directement à des bibliothèques de fonctions dans un langage de programmation généraliste (comme Java ou C++).

- 3) Plusieurs autres approches sont susceptibles d'intéresser les modélisateurs de dynamiques spatiales. Parmi elles, on se doit de mentionner DEVS, les SIG et les approches hybrides. Le formalisme DEVS (Ziegler, 1976) laisse beaucoup de liberté aux modélisateurs quant à la gestion du temps dans les modèles, avec la possibilité de combiner temps discret et temps continu, tout en restant dans un cadre formel précis. Il est suffisamment universel pour permettre la description de formes ascendantes ou descendantes de modélisation, et pour coupler plusieurs paradigmes de modélisation (la multi-modélisation : e.g. Quesnel et al, 2009). En ce qui concerne la gestion de l'espace, la situation est semblable à ce que l'on a vu pour les SMA, c'est à dire que sont favorisés soit une représentation sous la forme de grille, soit un couplage faible avec des SIG. Une prise en compte plus complète de topologies spatiales et de leurs dynamiques reste possible en complément, à travers une programmation directe. A l'inverse, les SIG, très complets dans la gestion de l'espace, présentent une faiblesse inhérente dans la gestion du temps, ce qui en fait de piètres outils de simulation de dynamiques spatiales. C'est cependant dans cette communauté qu'ont été menées les recherches les plus pertinentes sur la représentation et les ontologies géospatiales, les langages de modélisation, les questions d'échelle, de frontières floues, etc. (e.g. Wu, 1999 ; Peuquet, 2001 ; Claramunt et Parent, 2000). Enfin, il est intéressant de noter des approches hybrides visant à associer les points forts de plusieurs approches. Seles (Fall et Fall, 2001), alliant événements discrets, langage métier et comportement agent, en est un exemple connu. L'espace reste cependant représenté par un empilement de couches raster.

En résumé, on peut dire que ces différentes approches font toujours l'objet de recherches dans des communautés très dynamiques. Mais celles-ci échangent finalement assez peu, tant les paradigmes utilisés ont des identités différentes, marquées aussi bien par les disciplines scientifiques (SHS, SVT, STIC) que par les formes informatiques (logiciels) sous lesquelles ces approches ont été rendus disponibles pour les chercheurs.

C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

A l'origine de ce projet est le constat que les besoins en modélisation de dynamiques spatiales sont importants dans beaucoup de disciplines scientifiques alors que les approches actuelles peinent à concilier le spatial et la dynamique. En prenant comme exemple la forte contrainte liée au format utilisé pour représenter les entités spatiales (grilles, points, lignes ou polygones) dans les différentes approches, nous avons exploré l'opportunité d'imaginer de nouvelles primitives de modélisation, sans pour cela faire au préalable le choix d'une approche existante. D'ailleurs, il est apparu assez tôt que la prise en compte du spatial de manière dynamique nécessitait une approche qui mette l'accent sur les relations/interactions (entre entités d'un système) plus que sur les entités elles mêmes (approche ascendante) ou sur la description du fonctionnement global du système (approche descendante). L'utilisation de graphes (objets mathématiques exprimant un ensemble d'entités dont certaines sont en interaction) s'est imposée à nous pour cette raison. Le fait qu'il n'existe pas d'outils de modélisation de dynamique paysagère qui en fournit l'usage, nous a décidés à développer notre propre outil ; celui-ci devenant par là même un support de recherche et de développement méthodologiques. Pour cela, il a fallu au préalable identifier et définir formellement les concepts essentiels pour le modélisateur, construire ensuite un langage informatique de modélisation (baptisé Ocelet), avec grammaire et syntaxe, pour manipuler ces concepts, et enfin construire le compilateur, l'interface de modélisation et l'environnement d'exécution de simulations. Avec Ocelet, le paysage est considéré comme un système où des entités interagissent entre elles au travers de relations, selon des scénarios d'évolution. Le langage permet donc de construire des primitives ou d'utiliser des primitives préconstruites pour décrire ces entités, les mettre en relation, et d'établir des scénarios d'évolution du système. Les

primitives de modélisation sont ainsi de trois types : *entité*, *relation* et *scenario*, alors qu'au départ du projet, nous avions à l'esprit seulement des primitives de type entité. Un quatrième type de primitives qu'on a appelé *datafacer*, est utilisé pour interfacer le modèle avec différents types de données, notamment géospatiales. Nous nous sommes basés sur l'étude de plusieurs cas réels et complexes (présentés plus loin) à la fois pour identifier les concepts utilisés par les modélisateurs, mais aussi de les mettre à l'épreuve, en développant pour chaque cas d'étude le modèle correspondant.

C.4 RESULTATS OBTENUS

Les résultats du projet se déclinent en trois parties : (i) un outil de modélisation de dynamiques spatiales utilisable en l'état par des chercheurs, (ii) des avancées scientifiques en modélisation de l'environnement et en informatique (architecture orientée services et représentation des connaissances), et (iii) plusieurs modèles décrivant des cas d'étude sur des situations très variées.

Ocelet : un langage et un environnement de développement de modèles

Le résultat concret du projet est un outil qui permet de modéliser avec une grande liberté d'expression une portion de territoire pour pouvoir simuler son évolution dans le temps. L'approche est basée sur la manipulation de graphes, qui sont employés ici de manière innovante pour la modélisation de paysages dynamiques. L'outil lui-même est composé de trois parties : a) la partie visible par les utilisateurs/modélisateurs qu'est l'environnement de développement de modèles ; b) le compilateur de modèles écrits en Ocelet et le générateur de code Java et c) le moteur d'exécution qui permet de lancer les simulations. Le tableau suivant résume ces trois parties et donne les équipes qui y ont contribué, ainsi que le lien vers les fichiers informatiques correspondants.

a	Ocelet Modelling Platform (OMP)	OMP est l'environnement de développement permettant de modéliser avec Ocelet. Il regroupe en une seule interface-utilisateur homogène les différentes fonctions de création et maintenance de modèles, d'édition de source Ocelet, de compilation, de lancement de simulation, d'affichage ou d'exportation de résultats de simulations, et en cas de besoin donne l'accès au code Java généré par le compilateur. L'OMP est construit à partir du module RCP (Rich Client Platform) d'Eclipse. Le résultat se présente comme un environnement logiciel donnant accès à un ensemble de méthodes pour importer des données sous différents formats, écrire des modèles, les compiler, lancer des simulations et exporter les résultats en différents formats pour des logiciels de visualisation (en CSV – format texte dont les valeurs sont séparées par des ‘ ; ’ – pour afficher des graphiques sous Gnuplot, en shapefile pour les couches SIG statiques, en kml pour des cartes dynamiques sous Google Earth). L'environnement hérite des caractéristiques intéressantes d'Eclipse pour gérer les modèles en projet, l'éditeur de texte avec coloration syntaxique adaptée au langage Ocelet, l'organisation en fenêtres, avec notamment celle donnant une vue simplifiée d'un modèle (<i>outline</i>), en lien dynamique avec la fenêtre de l'éditeur de modèle, et les boutons pour compiler et lancer des simulations. La visualisation des résultats par des logiciels tiers (Google Earth, Gnuplot, ...) peut être lancée directement à partir de l'OMP. Voir la capture d'écran dans l'illustration donnée dans le résumé.
		Equipes. TETIS (R. Tylski, P Degenne, D Lo Seen)
		Lien. http://svn.ocelet.fr/PlatformBinaries/archive/last Système d'exploitation Linux, Windows et Mac OS ; 32 et 64 bits.

b	Ocelet Compiler	<p>Ocelet est un langage métier compilé, et les programmes écrits en Ocelet sont traduits automatiquement par un compilateur dans un langage généraliste (Java). L'architecture du compilateur d'Ocelet est assez classique. Il comprend un analyseur lexical (<i>lexer</i>) lit un fichier source de modèle Ocelet et en extrait une série d'unités lexicales, un analyseur syntaxique (<i>parser</i>) construit la structure syntaxique du programme à partir des unités lexicales. Cette structure prend une forme arborescente, c'est l'arbre de syntaxe abstraite (AST). L'AST est une représentation logique du programme que l'on souhaite compiler. Un analyseur sémantique parcourt l'AST, il effectue un contrôle de typage, enrichit l'AST pour préparer la génération de code, et génère une table des symboles. Un générateur de code parcourt l'AST et génère du code correspondant au contenu de chaque nœud de l'arbre dans un langage cible. Nous avons utilisé le compilateur de compilateur Tatoo développé à l'Université de Marne-La-Vallée (Cervelle et al, 2006) pour produire de manière automatique certains éléments du compilateur d'Ocelet. Pour faciliter l'usage et la diffusion du compilateur, l'ensemble des outils qui le constituent (Tatoo, et les différents modules que nous avons développés) sont empaquetés dans un seul fichier archive : ocelet-compiler.jar.</p>
		Equipes. UMLV (R Forax) et TETIS (M Castets, P Degenne)
		Lien. http://svn.ocelet.fr/Compiler/lib/ocelet-compiler.jar
c	Ocelet Runtime	<p>Le moteur d'exécution (<i>runtime</i>) est une bibliothèque de fonctions directement développées dans le langage cible (Java). Le code généré par le compilateur s'appuie sur des appels aux fonctions du moteur d'exécution. Ce moteur intègre en particulier la sémantique relative à la dynamique des graphes d'interaction et la gestion de la simultanéité de changements d'état des entités présentes dans ces graphes. Deux versions du moteur d'exécution ont été développées lors du projet, l'une pour être incluse dans OMP afin de le rendre opérationnel durant le projet (notamment pour développer les modèles correspondants aux cas d'étude), et l'autre, dans un but plus expérimental, utilisant une architecture basée sur les composants, afin d'expérimenter la construction de systèmes distribués dans le cas de modèles déployés sur plusieurs machines distantes. Le moteur d'exécution d'Ocelet est implémenté sous la forme d'un ensemble de classes Java, regroupées dans un seul fichier archive : ocelet-runtime.jar pour faciliter leur déploiement.</p>
		Equipes. INRIA (A Ait Lahcen, G Verger, D Parigot) et TETIS (P Degenne, M Castets)
		Lien. http://svn.ocelet.fr/Runtime/build/ocelet-runtime.jar

Résultats scientifiques

Plusieurs articles présentant les premiers résultats du projet ont déjà été publiés et sont listés en E.2. D'autres sont en préparation et concernent pour la plupart l'application de l'approche Ocelet dans divers cas d'étude. Dans la suite de ce paragraphe, nous donnons les grandes lignes des travaux déjà publiés. La justification des orientations adoptées (langage métier, primitives de modélisation) dans notre approche a été présentée lors d'un symposium sur la modélisation spatiale des paysages pendant la première année du projet (Degenne et al, 2008). Certains travaux présentés, dont le notre, ont été retenus pour faire partie d'un numéro spécial sur cette thématique. Dans cette contribution

(Degenne et al, 2009) nous donnons les premiers éléments du langage Ocelet, ainsi que les premières sorties d'un modèle simple (Lotka-Volterra) construit avec Ocelet. Dans un article plus informatique, nous exposons les arguments et motivations du choix d'une approche orientée services pour l'implémentation du moteur d'exécution de notre langage métier (Ait Lahcen et al, 2009). Sur la possibilité qu'offre Ocelet de construire des modèles à partir de primitives construites par d'autres, une étude soulève les risques d'incohérence entre parties d'un même modèle et propose une approche basée sur les ontologies (i.e. OWL – *Web Ontology Language*, Grau et al, 2008) issue des travaux sur le web sémantique) pour lever ces difficultés (Curé et al, 2010). Deux aspects essentiels d'Ocelet que sont l'utilisation de graphe d'interaction, avec en particulier la nécessité de faire porter de la sémantique sur les arcs des graphes, et la possibilité d'inclure différents points de vue dans un même modèle, sont présentés dans Degenne et al (2010). Enfin une première tentative d'application sur un cas réel (modélisation de la colonisation de banc de vase par la mangrove), avec Ocelet qui était alors en cours de construction, est donnée dans Proisy et al (2010).

Applications sur quatre cas d'étude

Les autres travaux en cours de valorisation concernent des applications d'Ocelet (dans sa version opérationnelle) à quatre des cas d'étude qui ont servi de guides le long du projet. Ces cas d'étude avaient été choisis d'une part pour leur diversité de situations à modéliser, et d'autre part parce que nos équipes y travaillaient déjà, et ont donc accumulé des données et des connaissances sur les problématiques concernées. Dans le tableau suivant sont données une description succincte de la façon dont Ocelet a été utilisé pour traiter chaque cas d'étude, les personnes qui y ont travaillé et un lien vers le modèle qui en a résulté (un répertoire archivé qui contient le modèle écrit en Ocelet, ainsi que les datafacs nécessaires, les données d'entrée, etc.). Le modèle peut ainsi être importé dans OMP pour être utilisé et/ou adapté. Le fichier contient aussi les sorties de simulations antérieures qui peuvent donc être visualisées dans Google Earth. Des copies d'écran sont données en annexe, même si elles ne peuvent pas exprimer le rendu dynamique de ces simulations.

1	<i>Dynamique côtière d'écosystèmes de mangroves</i>	Une partie des énormes quantités de sédiments déversés annuellement par l'Amazonie dans l'océan Atlantique est déviée le long de côtes des Guyanes par des courants océaniques, alimentant une alternance de processus de déposition et mise en re-suspension des vases. Des gigantesques bancs de vase d'une longueur de 10 à 40 km se déplacent depuis les côtes de la Guyane Française jusqu'au Venezuela après formation au Nord de l'état de l'Amapá (Brésil). Les interactions océan-vase-mangrove sous-tendent un système extrêmement complexe dans lequel des processus sédimentaires, écologiques, morphodynamiques, biogéochimiques et océanographiques se trouvent intimement liés à différentes échelles spatiales et temporelles (e.g. Fromard et al, 2004). Afin de mieux comprendre ce système, nous tentons de modéliser l'évolution du trait de côte de la Guyane française entre Cayenne et Kourou pendant la période 1986-2006. Cette évolution est modélisée comme résultant de l'effet combiné de la houle, des courants et du déplacement le long de la côte d'un banc de vase d'environ 20 km de long et 5 km de large, en grande partie immergé, et qui est lui même colonisé par la végétation de mangrove. Le chenier (immobile) et la situation initiale du trait de côte (mobile) sont relevés sur une image satellite de 1986 et inscrits dans un shapefile. Celui-ci qui est lu en entrée du modèle pour initialiser les entités 'chenier' et 'coastline' dans le modèle. Le champ de houle journalier est fourni par ERA-40 sous la forme d'un fichier CSV qui est lu dans le modèle via l'entité 'ocean'. Une relation de forçage de 'ocean' sur 'coastline' décrit de manière empirique la déformation de 'coastline' en fonction de la houle journalière, des courants
---	---	--

		<p>dominants, mais aussi de la position du banc de base qui agit comme une protection contre l'effet de la houle. Le trait de côte est représenté par une polyligne, et la déformation est modélisée comme le déplacement de chaque point de la polyligne indépendamment des autres. Même si les mécanismes pris en compte (forme, déplacement, et effet atténuateur du banc de vase, déformation du trait de côte, colonisation de banc de vase) sont modélisés de manière très simple, on retrouve les grandes tendances de l'évolution du trait de côte de la zone telles qu'observées dans la série de 8 images satellite entre 1986 et 2006. Cet exemple montre la possibilité d'agir directement sur la forme d'un objet géographique dans un modèle. Une modélisation avec une description plus fidèle de ces mécanismes est en cours.</p> <p>Equipes. AMAP (C Proisy, E Blanchard) et TETIS (D Lo Seen, P Degenne)</p> <p>Lien. http://svn.ocelet.fr/SampleModels/Mangrove.zip</p>
2	<i>Dynamique d'occupation du sol en zone d'agroforesterie</i>	<p>Le district du Coorg (Kodagu) dans l'état du Karnataka, dans le sud de l'Inde, est caractérisé par un terrain vallonné, des pentes douces et une gamme climatique propices à la culture du café, et des zones de bas-fonds qui conviennent à la riziculture. Pendant ces dernières décennies, la culture du café ne s'est plus cantonnée à sa zone traditionnelle (i.e. le <i>coffee belt</i>) et a commencé à grignoter sur la forêt. La forêt naturelle a d'abord été éclaircie afin de permettre au café de profiter de l'ombre de grands arbres émergents. Ceux-ci ne pouvant se régénérer, ont graduellement été remplacés par des arbres à croissance rapide tel le <i>Gravillea (Silver Oak)</i> pour fournir l'ombre nécessaire au café. Les bas-fonds cultivés essentiellement en riz peuvent être convertis en d'autres cultures ou laissés en jachère. Dans cet exemple, une zone proche du village de Kottolli est modélisée comme un automate à nombre fini d'états, avec les parcelles comme entités et les différents types d'occupation du sol comme états possibles. Les règles de transition entre états sont définies par des niveaux de probabilité par pas de temps. Avec Ocelet, il est aisé de considérer des niveaux de probabilité variables dans le temps, et qui peuvent dépendre de l'état des parcelles voisines. En entrée on a un shapefile contenant des polygones. Dans le modèle, chaque parcelle est une entité distincte représentée par un polygone. Un graphe en étoile relie chaque parcelle à une entité 'study area' centrale. Un seul appel au service de la relation à chaque pas de temps permet alors de décider d'un changement d'état pour chacune des parcelles.</p> <p>Equipes AMAP (J Alet, M Castets, C Gaucherel) et TETIS (D Lo Seen, P Degenne)</p> <p>Lien. http://svn.ocelet.fr/SampleModels/Kottolli.zip</p>
3	<i>Fièvre de la Vallée du Rift (RVF)</i>	<p>La <i>Rift Valley Fever (RVF)</i> est une maladie vectorielle (transmise ici par des moustiques) qui affectent les ruminants et parfois les humains. Elle a été observée dans la plupart des pays de l'Afrique subsaharienne. Alors qu'en Afrique de l'Est et du Sud des foyers de RVF surviennent suite à des surplus pluviométriques importants (Davies et al, 1985), les facteurs d'émergence en Afrique de l'Ouest sont encore mal connus et semblent plus complexes. Dans la région du Ferlo, au nord du Sénégal, les mares temporaires jouent un rôle central dans la transmission de la maladie, car celles-ci constituent les</p>

		<p>principaux gîtes larvaires des deux principaux moustiques vecteurs de la maladie que sont <i>Aedes vexans</i> et <i>Culex poicilipes</i>, et c'est là où les éleveurs transhumants viennent abreuver leur bétail. Dans sa thèse V Soti (2011) utilise la modélisation de la dynamique des mares et des populations de moustiques pour mieux expliquer les périodes favorables à l'apparition de foyers RVF. Dans notre cas d'étude, le but est de reprendre avec Ocelet les modèles qui avaient été développés sous R afin de bénéficier des avantages apportés par notre approche. Notamment, dans le cas présent où il est nécessaire de « coupler » plusieurs modèles, Ocelet permet de modéliser de manière incrémentale, en partant d'un premier processus (la dynamique des mares) et en y ajoutant au fur et à mesure des processus supplémentaires et les entités associées (les populations de moustiques). Une possibilité intéressante est de lancer les simulations sur plusieurs mares en même temps, comme dans le cas précédent d'un automate à nombre fini d'états, sauf qu'ici les changements de surface en eau et de niveaux d'eau dans les mares se font à l'aide d'un bilan hydrique. D'autres aspects moins importants mais tout aussi utiles concernent la possibilité de renseigner les entités mares directement à partir du shapefile, de sauver l'évolution de la surface en eau (buffer sur l'extension maximale d'une mare) en fichier kml, ou encore d'utiliser des variables historiques (on gère les valeurs précédentes de certaines variables du système) dans le modèle. Une possibilité que permet de tenter avec Ocelet, et qui n'était pas possible avec l'approche R est l'influence des mares voisines, soit dans le bilan hydrique, soit dans le calcul des populations de moustiques. Enfin, il s'agira aussi de compléter le modèle en y ajoutant un processus, et les entités nécessaires, concernant la transmission aux animaux positionnés dans les parcs de nuit, en fonction de la proximité des mares.</p>
		<p>Equipes. TETIS (V Soti, R Tylski, A Tran, P Degenne, D Lo Seen)</p>
		<p>Lien. http://svn.ocelet.fr/SampleModels/RVF.zip</p>
4	<p><i>Dissémination de phytopathogènes par voie aérienne entre parcelles de culture</i></p>	<p>Ce cas d'étude est fictif dans le sens où il n'était pas directement étudié par nos équipes. Cependant il représente une situation intéressante car difficilement traitée par les méthodes actuelles. C'est la situation d'un parcellaire d'une zone de culture où quelques parcelles sont affectées par un phytopathogène qui peut se disperser par voie aérienne aux parcelles voisines, comme c'est le cas de certaines maladies fongiques par exemple. Le vent doit pouvoir être pris en compte (vitesse, direction) ainsi que l'effet écran de parcelles insensibles aux pathogènes et qui ne peuvent à leur tour relayer la maladie. Cette situation peut être modélisée avec Ocelet à l'aide d'un graphe de voisinage entre chaque parcelle et ses voisines. L'arc entre une parcelle et une voisine porte le 'degré' et la 'direction' du voisinage, et surtout les règles de diffusion d'un pathogène en fonction de quelques critères comme la direction et la vitesse du vent et un coefficient de voisinage entre deux parcelles. Lors du déroulement du scénario, un datafacer permet d'extraire le graphe de voisinage à partir du parcellaire stocké dans une base de données géographiques. L'initialisation du graphe, qui consiste à instancier les entités 'parcelle' avec leurs états de contamination ou leur statut de parcelle écran, est aussi faite pendant ce scénario. La simulation peut ensuite faire évoluer l'état du graphe d'interaction chaque jour en fournissant des données journalières de direction et de vitesse du vent (lues dans un fichier Csv associé à l'entité 'environnement'). Au cours de la simulation, un état du</p>

	<p>parcellaire est enregistré chaque année au format KML, ce qui permet l'affichage dans Google Earth de la dynamique de progression de la maladie dans la zone d'étude. Ce modèle de dissémination illustre la capacité d'Ocelet à simuler un type de processus d'interaction de proche en proche à l'aide de graphes de voisinage. A partir de ce premier prototype, le modélisateur peut imaginer et construire des modèles plus réalistes en améliorant par exemple la façon de construire le graphe de voisinage, de spécifier les règles de contamination, ou encore en introduisant des relations supplémentaires pour exprimer la possibilité d'autres modes de diffusion de la maladie.</p>
	<p>Equipes. TETIS (P Degenne, D Lo Seen, C Baron)</p>
	<p>Lien. http://svn.ocelet.fr/SampleModels/Contamination.zip</p>

C.5 DISCUSSION

Les objectifs concrets du projet ont été atteints : on dispose à l'issue du projet d'un outil opérationnel de modélisation et de simulation de dynamiques spatiales, ainsi que de plusieurs modèles ou prototypes de modèles sur des cas d'étude décrivant des situations très variées. Mais au delà de ces objectifs concrets, nous visions l'exploration d'une nouvelle démarche donnant plus de liberté d'expression aux modélisateurs. L'idée de départ était d'imaginer et de construire pendant le projet des primitives de modélisation mieux adaptées à l'expression de dynamiques spatiales. Cette idée a quelque peu évolué dans le sens donné à la notion de primitive. Alors qu'au départ elle exprimait un « morceau » de l'espace géographique, pris comme un « bloc » de construction, nous nous sommes vite rendu compte que cette façon de voir était limitée. Avec le langage de modélisation que nous avons développé, les concepts de base de langage deviennent des primitives. Ainsi, nos primitives sont de trois natures. Nous avons des entités (ce qui se rapproche le plus de nos primitives de départ), mais aussi des scénarios, et surtout des relations. Et c'est dans la manière de décrire les relations que se situe, d'après nous, l'aspect le plus innovant de ce projet. C'est la nécessité d'exprimer différents types de relations (fonctionnelles, hiérarchiques et spatiales) qui nous a conduits à employer des graphes dont les arcs portent la sémantique des interactions. Cette façon de concevoir un modèle en mettant en avant les interactions entre entités tranche avec l'approche multi-agent où l'accent est mis sur le comportement des entités. Elle est aussi fondamentalement différente des approches descendantes qui s'attachent à décrire le comportement d'un système de manière globale. Entre ces deux approches (ascendante et descendante), la notre peut être dite intermédiaire, car elle permet à la fois de gérer de manière globale certaines parties du système, tout en donnant un comportement local et individuel à certaines entités du système.

Nous n'avons pas identifié des verrous à franchir, mais plutôt des voies à explorer. Les quelques modèles qu'on a été amené à développer lors de ce projet indiquent que notre approche est très prometteuse, notamment par les nouvelles possibilités offertes pour décrire les dynamiques spatiales. Cependant nous sommes conscients que ces nouvelles possibilités ont été peu explorées. Par exemple, on se pose la question de savoir s'il est possible de couvrir une grande part des situations à modéliser avec seulement un nombre restreint de types de primitives. Nous le pensons, au vu des primitives utilisées pour les cas d'étude. Une des études que nous souhaiterions mener dès que possible est justement de répondre à cette question de manière approfondie. La possibilité d'intégrer dans un même modèle plusieurs domaines de compétences (écologie, géographie, agronomie, etc.) peut soulever des problèmes de cohérence qui appellent à l'utilisation des ontologies pour pouvoir raisonner sur les primitives. Dans la perspective de la construction d'une interface graphique d'assistance à la modélisation, il sera utile d'y intégrer un raisonneur basé sur les ontologies. D'autres perspectives concernent l'amélioration de l'outil et des méthodes qu'il propose. Entre autres, on peut

mentionner l'intégration complète du système à composants dans la plateforme, la possibilité d'utiliser des hypergraphes (pratiquement des graphes avec des arcs qui relient plus de deux nœuds) et de disposer de bibliothèques de primitives enrichies.

Nous pensons qu'il est un peu tôt pour mesurer l'impact scientifique, industriel et sociétal de notre travail. Mais nous sommes convaincus que ce travail contribue à répondre à une attente forte et très actuelle sur la possibilité de traiter des questions complexes à l'aide d'outils de simulation. Avant même la fin de ce projet, nous avons été sollicités plusieurs fois pour participer à de futurs projets mettant en œuvre notre outil de simulation. Maintenant que les bases de cette nouvelle approche sont posées, nous pouvons d'une part nous atteler à la consolider, et d'autre part, l'employer dans des projets de recherche en collaboration avec des chercheurs de spécialités différentes.

C.6 CONCLUSIONS

Le projet a produit un outil qui permet de modéliser avec une grande liberté d'expression une portion de territoire pour pouvoir simuler son évolution dans le temps. Il se présente comme un environnement logiciel donnant accès à un ensemble de méthodes et des primitives de modélisation. Comparée aux approches ascendantes ou descendantes, celle-ci met davantage l'accent sur les interactions entre entités. Elle est basée sur la manipulation de graphes qui portent de la sémantique sur les arcs, et qui sont employés ici de manière innovante pour la modélisation de paysages dynamiques. Cette approche offre des perspectives d'application dans différents domaines pour l'étude de systèmes où s'expriment des dynamiques spatiales.

C.7 REFERENCES

- Batty M, Xie Y, Sun Z, 1999. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23: 205-233.
- Bousquet F, Bakam I, Proton H, Le Page C, 1998. Cormas: Common-pool resources and multi-agent systems. In *Angel Pasqual del Pobil, José Mira, and Moonis Ali, editors; Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence, volume 1416 of Lecture Notes in Computer Science*, pages 826-837. Springer Berlin/Heidelberg.
- Bousquet F, Le Page C, 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling*, 176(3-4):313-332.
- Cervelle J, Forax R, Roussel G, 2006. Tatoo : An innovative parser generator. In *Ralf Gitzel, Markus Alesky, Martin Schader, and Chandra Krintz, editors, 4th International Conference on Principles and Practices of Programming in Java (PPPJ'06), ACM International Conference Proceedings*, pages 13-20.
- Costanza R, 1987. Simulation modeling on the Macintosh using Stella. *BioScience*, 37:129-132.
- Claramunt C, Parent C, 2000. Modelling concepts for the representation of evolution constraints, in *International Workshop on Emerging Technologies for Geo-Based Applications*, May 22-25, Ascona, Switzerland, pp. 169-184.
- Davies FG, Linthicum KJ, James AD, 1985. Rainfall and epizootic Rift Valley fever. *Bull. World Health Organ.*, 63(5):941-943.
- Eberlein RL, Peterson DW, 1992. Understanding models with Vensim. *European Journal of Operational Research*, 59(1):216-219.
- Fall A, Fall J, 2001. A domain-specific language for models of landscape dynamics. *Ecological Modelling*, 141:1-18.
- Ferber J, 1995. Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective. *InterEditions*.
- Fromard F, Vega C, Proisy C, 2004. Half a century of dynamic coastal change affecting mangrove shorelines of French Guiana. A case study based on remote sensing data analyses and field surveys. *Marine Geology*, 208(2-4):265-280.
- Forrester JW, 1968. Principles of Systems. *Wright-Allen Press*, Cambridge, Massachusetts.
- Grau BC, Horrocks I, Motik B, Parsia B, Patel-Schneider PF, Sattler U, 2008. Owl 2: The next step for owl. *J. Web Sem.*, 6(4):309-322.
- Kermack WO, McKendrick AG, 1927.. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 115(772) :700-721.
- Lajoie G , Hagen-Zanker A, 2007. La simulation de l'étalement urbain à La Réunion : apport de l'automate cellulaire Metronamica® pour la prospective territoriale. *Cybergeo : European Journal of Geography, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques*, article 405, mis en ligne le 18 octobre 2007, modifié le 21 avril 2008. URL : <http://cybergeo.revues.org/11882>. Consulté le 30 juin 2011.
- Langlois A, Phipps M, 1997. Automates cellulaires : Application à la simulation urbaine. *Hermès*, 197 p.
- Minar N, Burkhart R, Langton C, Askenazi M, 1996. The Swarm simulation system: A toolkit for building multi-agent simulations. *Simulation*, (96-06-042):1-11.
- Peuquet D, 2001. Making Space for Time: Issues in Space-Time Data Representation, *Geoinformatica*, 5(1):11-32.
- Quesnel G, Duboz R, Ramat E, 2009. The virtual laboratory environment - an operational framework for multi-modelling, simulation and analysis of complex dynamical systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17:641-653.
- von Neumann J, 1966. Theory of Self-Reproducing Automata. *University of Illinois Press*, Champaign, IL, USA.
- Verhulst PF, 1838. Correspondance Mathématique et Physique de l'observatoire de Bruxelles, volume X, chapitre Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement, pages 113-121. Quetelet, A.
- Wilensky U, 1999. NetLogo. *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling*, Northwestern University, Evanston, IL (<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>).
- Wu J, 1999. Hierarchy and scaling: Extrapolating information along a scaling ladder. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25:367-380.
- Ziegler BP, 1976. Theory Of Modeling and Simulation. *Wiley Interscience*.

D LISTE DES LIVRABLES

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
	1				

E IMPACT DU PROJET

E.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaires
International	Revue à comité de lecture	1	
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	5	
France	Revue à comité de lecture		
	Ouvrages, mémoires ou chapitres d'ouvrage		6
	Communications (conférence)		
Actions de diffusion	Articles vulgarisation		1
	Conférences vulgarisation		
	Autres		

Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	
Brevet internationaux en cours d'obtention	
Brevets nationaux obtenus	
Brevet nationaux en cours d'obtention	
Licences d'exploitation (obtention / cession)	
Créations d'entreprises ou essaimage	
Nouveaux projets collaboratifs	2 (2011)
Colloques scientifiques	
Autres (préciser)	1 (communauté d'utilisateurs)

E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Articles dans une revue internationale à comité de lecture

Degenne P, Lo Seen D, Parigot D, Forax R, Tran A, Ait Lahcen A, Curé O, Jeansoulin R, 2009. Design of a domain specific language for modelling processes in landscapes. *Ecological Modelling*, 220(24):3527-3535. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.06.018>

Communications avec actes dans un congrès international

Degenne P, Ait Lahcen A, Curé O, Forax R, Parigot D, Lo Seen D, 2010. Modelling with behavioural graphs. Do you speak Ocelet? *International Congress on Environmental Modelling and Software*, July 5-8, Ottawa, Ontario, Canada. <http://www.iemss.org/iemss2010/>

Curé O, Forax R, Degenne P, Lo Seen D, Parigot D, Ait Lahcen A, 2010. Ocelet: An Ontology-based Domain Specific Language to Model Complex Domains. *The First International Conference on Models and Ontology-based Design of Protocols, Architectures and Services - MOPAS 2010*, June 13-19, Athens, Greece. <http://www.iaria.org/conferences2010/MOPAS10.html>

Proisy C, Blanchard E, Ait Lahcen A, Degenne P, Lo Seen D, 2010. Toward the simulation of the Amazon-influenced mangrove-fringed coasts dynamics using Ocelet. *International Conference on Integrative Landscape Modelling - Landmod 2010*, February 3-5, Montpellier, France. <http://www.umr-lisah.fr/rtra-projects/landmod2010>

Ait Lahcen A, Degenne P, Lo Seen D, Parigot D, 2009. Developing a Service-Oriented Component Framework for a Landscape Modeling Language. *The 13th IASTED International Conference on Software Engineering and Applications (SEA 2009)* November 2 – 4, Cambridge, Massachusetts (USA). <http://www.actapress.com/Abstract.aspx?paperId=36773>

Degenne P, Lo Seen D, Parigot D, Jeansoulin R, 2008. Design of a domain specific language and primitives for modelling dynamic landscapes. In *Spatial Landscape Modelling Symposium*, Toulouse (France), 3–5 June.

Articles de vulgarisation

Degenne P, Lo Seen D, 2010. Modéliser pour mieux comprendre les paysages dont les changements nous affectent. *Dossier Agropolis No. 9* « Information Spatiale pour l'Environnement et les Territoires ». (<http://www.agropolis.fr/pdf/publications/dossier-teledetection.pdf>).

Mémoires

Ait Lahcen, A, 2012. Contribution à la définition d'un langage métier pour la modélisation des paysages. Thèse en co-tutelle INRIA et Université Mohammed V Agdal. Directeur de thèse : Didier Parigot, INRIA – Sophia Antipolis.

Alet J, 2010. Modélisation de paysages agroforestiers du sud de l'Inde. M2 ingénieur AgroParisTech - Engref.

Castets M, 2010. En quoi la modélisation des écosystèmes est-elle améliorée par le développement de nouveaux concepts ? Mémoire de fin d'études – Diplôme d'Ingénieur de l'EPSE (école d'ingénierie informatique), Montpellier.

Degenne P, 2011. Une approche générique de la modélisation spatiale et temporelle. Thèse de doctorat de l'Université Paris Est. Directeur de thèse : Robert Jeansoulin, *Laboratoire d'informatique Gaspard Monge, Marne-la-Vallée*.

Nouis S, 2010. Vers une formalisation du paysage : Modélisation et grammaires formelles. M2 ingénieur Polytechnique, Paris.

Tylski R, 2010. Ocelet et application de modèles de la fièvre de la Vallée du Rift. Rapport de stage du Master 2ème année – Spécialité : Ingénierie du logiciel libre, *Université du Littoral Côte d'Opale, Calais*.

E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

Nouveaux projets collaboratifs

La démarche Ocelet a été utilisée dans le montage de deux projets collaboratifs portés par l'UMR TETIS et qui ont été acceptés en 2011 :

- a) le projet Equipex 2010 GEOSUD (Infrastructure nationale d'imagerie satellitaire pour la recherche sur l'environnement et les territoires et ses applications à la gestion et aux politiques publiques) dans lequel la plateforme Ocelet sera utilisée pour analyser les dynamiques spatiales observées dans des séries temporelles d'images satellite, et
- b) le projet ANR-Agrobiosphère 2011 DESCARTES (Outil de simulation cartographique pour l'aide à l'évaluation agro-écologique de scénarios de l'usage des sols en milieu insulaire tropical) où l'outil de simulation cartographique sera construit en profitant des possibilités offertes par le langage Ocelet, notamment celle de pouvoir décrire avec un même formalisme des relations spatiales, fonctionnelles, sociales ou hiérarchiques.

Communauté d'utilisateurs

La plateforme de modélisation est destinée à être ouverte à une communauté d'utilisateurs composée notamment de chercheurs qui souhaitent utiliser la modélisation de dynamiques spatiales parmi leurs outils de recherche. Cependant, même si la plateforme est déjà disponible en ligne, nous souhaitons d'abord favoriser sa diffusion au travers de collaborations sur des projets de recherche méthodologique ou appliquée.

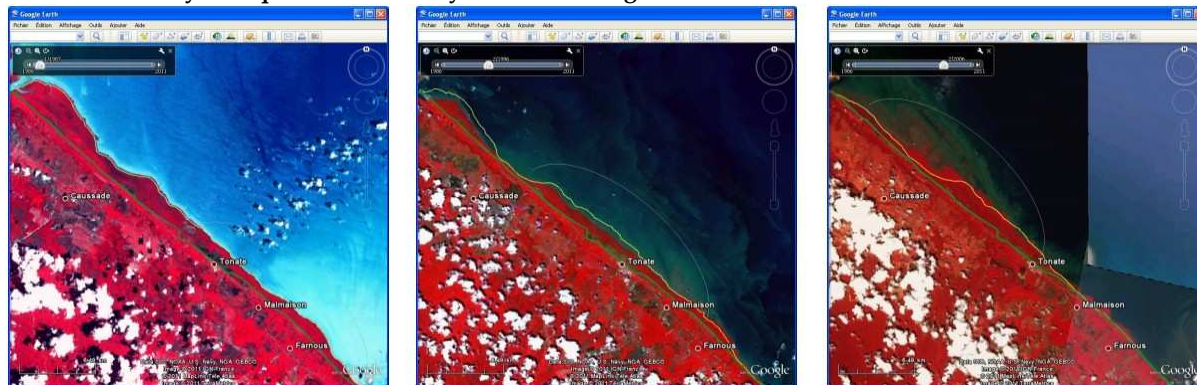
E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Castets Mathieu	H	math.castets@gmail.com	Mai 2011	Diplôme d'ingénieur EPSI	France	stage	Cirad	Ingénieur informatique	3	17 déc 2010	CDD	Institut de recherche étranger	ingénieur	non	oui
Tylski Rémi	H	remi.tylski@gmail.com	Mai 2011	Master 2 ^{ème} année	France	stage	Cirad	Ingénieur informatique	3	12 déc 2010	Thèse	Institut de recherche France	chercheur	non	oui

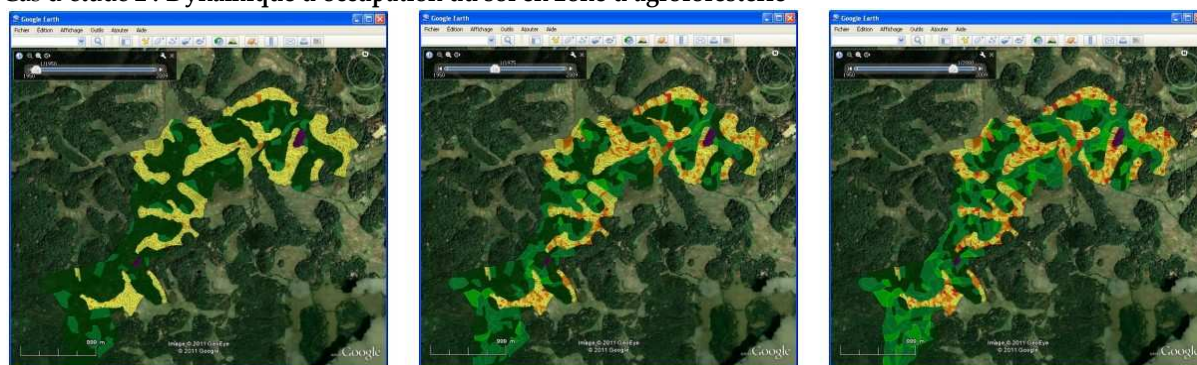
F ANNEXES

Copies d'écran (c.f. C.4 Résultats obtenus : Applications sur quatre cas d'étude)

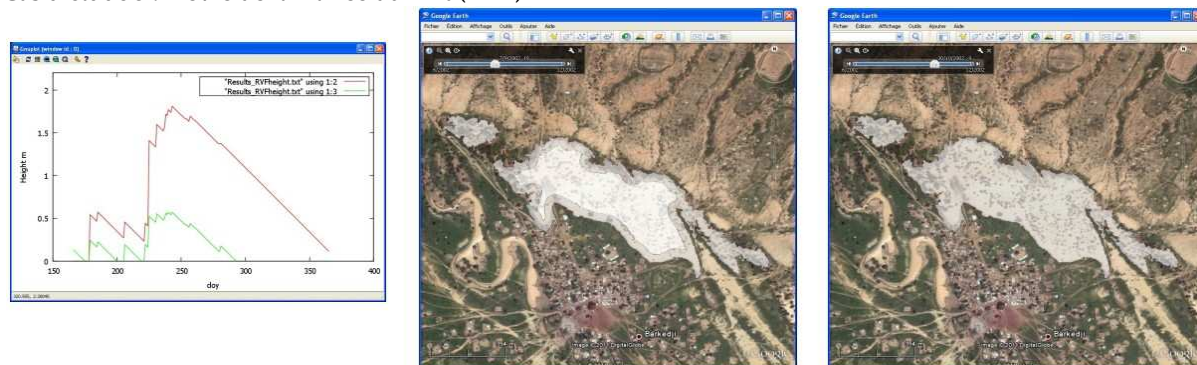
Cas d'étude 1 : Dynamique côtière d'écosystèmes de mangroves



Cas d'étude 2 : Dynamique d'occupation du sol en zone d'agroforesterie



Cas d'étude 3 : Fièvre de la Vallée du Rift (RVF)



Cas d'étude 4 : Dissémination de phytopathogènes par voie aérienne entre parcelles de culture

